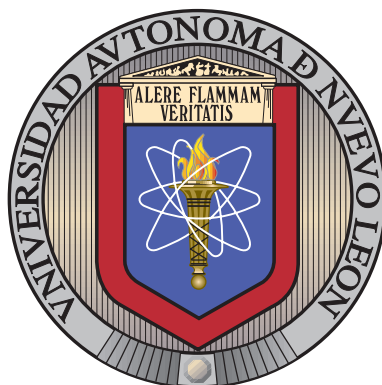


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS



UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN
APLICADO AL SISTEMA DE SALUD DURANTE LA
PANDEMIA POR EL COVID-19

POR

DIANA JAZMÍN JASSO DÍAZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN MATEMÁTICAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS



UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN
APLICADO AL SISTEMA DE SALUD DURANTE LA
PANDEMIA POR EL COVID-19

POR

DIANA JAZMÍN JASSO DÍAZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN MATEMÁTICAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2021

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Un problema de localización y asignación aplicado al sistema de salud durante la pandemia por el COVID-19”, realizada por la alumna Diana Jazmín Jasso Díaz, con número de matrícula 1553995, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Matemáticas.

El Comité de Tesis

Dr. José Fernando Camacho Vallejo
Director

Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas
Codirector

Dra. Martha Selene Casas Ramírez
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas
Coordinador del Posgrado en Ciencias con
Orientación en Matemáticas

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio 2021

Dedicatoria

A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, a mis padres, el Sr. Baldemar Jasso Rojas y la Sra. Ma. de la Paz Díaz Camarillo, quienes me han brindado su apoyo, comprensión y amor, mismos que constantemente me han impulsado a estudiar, a ser una persona de bien y productiva. De igual forma, dedico esta tesis a mi hermano, Baldemar Jasso Díaz, quien siempre ha confiado en mí y me ha dado su apoyo incondicional. Además de dedicarla a mis coasesores quienes me han ayudado realizar este trabajo de investigación, en especial a mi asesor el Dr. José Fernando Camacho Vallejo, el cual ha estado a mi lado a lo largo de este proceso.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	viii
1. Introducción	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Motivación	3
1.4. Estructura	3
2. Revisión de literatura	4
2.1. Modelos de localización y asignación para servicios de ambulancias	4
2.2. Modelos de localización de instalaciones relacionadas con servicios de salud	8
2.3. Modelos de localización y asignación durante diferentes eventos de gran escala	12
3. Definición del Problema	15
4. Modelación matemática	16
5. Caso de estudio	19
6. Experimentación Computacional	25
6.1. Resultados	27
6.1.1. Resultados de la instancia Este.	27

6.1.2. Resultados de la instancia Oeste.	29
6.1.3. Resultados de la instancia Metropolitana.	30
6.1.4. Resultados de la instancia Rural.	33
7. Conclusiones	36
7.1. Trabajo futuro	37

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Bases de unidades móviles de atención.	19
2.	Centros médicos.	20
3.	Posibles puntos de infección de la zona Este.	21
4.	Posibles puntos de infección de la zona Oeste.	22
5.	Posibles puntos de infección de la zona Metropolitana.	22
6.	Posibles puntos de infección de la zona Rural.	23
7.	Bases de unidades móviles localizadas en la zona Este.	28
8.	Centros médicos localizados en la zona Este.	28
9.	Bases de unidades móviles localizadas en la zona Oeste.	29
10.	Centros médicos localizados en la zona Oeste.	30
11.	Bases de unidades móviles ubicadas de la zona Metropolitana.	31
12.	Bases de unidades móviles ubicadas en la unión de las instancias Este y Oeste.	31
13.	Centros médicos ubicados de la zona Metropolitana.	32
14.	Centros médicos ubicados en la unión de las instancias Este y Oeste. . . .	32
15.	Bases de unidades móviles abiertas de la zona Rural.	33
16.	Centros médicos abiertos de la zona Rural.	34
17.	Tiempo total del recorrido.	35

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Modelos de localización y asignación para servicios de ambulancias.	7
2.	Modelos de localización de instalaciones relacionadas con servicios de salud.	11
3.	Modelos de localización y asignación durante diferentes eventos de gran escala.	14
4.	Dimensiones de las instancias.	26
5.	Valores óptimos y tiempos de respuesta.	26

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios, por haberme dado la capacidad y la perseverancia para no dejarme desistir y poder terminar esta etapa de mi vida, a mis padres, el Sr. Baldemar Jasso Rojas y la Sra. Ma. de la Paz Díaz Camarillo, por darme su apoyo, cariño y escucharme en el momento que lo requerí, además de ser mi impulso y motivación para superarme, y a mi hermano, Baldemar Jasso Díaz, por ser mi compañero de estudio cuando más lo necesité.

Agradezco también a mi asesor el Dr. José Fernando Camacho Vallejo por confiar en mí y haberme animado a realizar esta nueva etapa, por su paciencia y por todas las veces que fue necesario corregirme, pero principalmente por todo lo que le me ha enseñado durante de estos años, así como a mis coasesores y demás profesores que me han dejado alguna enseñanza.

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea implementar una estrategia a fin de proveer un servicio a domicilio tercerizado para la realización de las pruebas Covid–19 en el área metropolitana de Monterrey con la intención de mitigar la propagación del Covid–19. El objetivo es aumentar el número de pruebas a domicilio, siendo estas tercerizadas en aquellos centros médicos que no cuentan con la facilidad de servicio a domicilio. Además de localizar y asignar servicios de unidades móviles y centros médicos para la realización de las mismas.

Para ello se presenta un modelo de programación lineal binario además de un caso de estudio real con información de los diferentes centros médicos, de servicios de unidades móviles y de los posibles puntos de infección en el área metropolitana de Monterrey.

Palabras clave: Covid–19, localización, asignación, unidades móviles, centros médicos, puntos de infección.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Durante el siglo pasado se presentaron tres pandemias causadas por la influenza, la primera ocurrió en 1918–1919 conocida como la “influenza española” provocando la muerte de 50 millones de personas en el mundo, siendo esta la de mayor impacto de las tres [41, 31, 43]. En 1957–1958 ocurre la segunda llamada la “influenza asiática” [41, 31, 27] y en 1968–1969 se da la tercera recibiendo el nombre de “influenza de Hong Kong”, aunque su origen es incierto se le atribuye este nombre dado que la mayor parte de personas contagiadas provenían de Hong Kong [41, 31, 10].

Actualmente, desde noviembre de 2019 se ha presentado una nueva pandemia originaria de Wuhan, provincia de Hubei, China causada por el coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo severo (SARS–CoV–2) denominada por la Organización Mundial de la Salud como la enfermedad del coronavirus disease 2019 “Covid–19” [47, 20]. Estudios recientes habían previsto que la próxima pandemia se originaría en el sureste asiático, como las últimas dos, alcanzando una propagación mundial en 6 meses o menos dado a la globalización [31]. Dicho pronóstico fue acertado, ya que la actual pandemia se originó en Asia propagándose en los 6 meses predichos. Al 6 de septiembre de 2020, se habían documentado 26,763,217 casos confirmados en todo el mundo, con un total de 876,616 muertes [33].

La pandemia del Covid–19 ha impactado al mundo en todos los sectores provocando una crisis económica. A principios de marzo del presente año, la guerra de precios del petróleo entre Rusia y Arabia Saudita provocó la caída del precio del petróleo, tras una negativa por parte de Rusia a disminuir su producción de petróleo ocasionando que Arabia Saudita tomara represalias. Por su parte, la pandemia redujo la demanda de petróleo provocando una caída en su precio [32, 35]. Al mismo tiempo, las compras de pánico ocurrían en todo el mundo complicando el abastecimiento de alimentos y artículos de primera necesidad en supermercados [32].

En la educación, la pandemia afectó todos los niveles educativos, desde preescolar hasta el nivel superior. Al 1 de abril de 2020 habían 1,596,842,024 estudiantes afectados en todo el mundo [44]. Algunos países optaron por cerrar las escuelas completamente, otros parcialmente y unos más por mantenerlas abiertas. También provocó la suspensión de investigaciones de posgrado en áreas ajenas al Covid–19 y la cancelación de congresos de investigación. Por otra parte, los sistemas de salud del mundo se han visto saturados, los hospitales sobrepasaron su capacidad debido a la gran demanda afectando a la cadena de suministro farmacéutica y a los trabajadores de la salud al enfrentar un alto riesgo a contraer el Covid–19 [32, 35].

En otros sectores, como la hotelería, turismo y aviación, se vieron afectados miles de trabajadores por la suspensión de viajes, cierre de fronteras y controles estrictos para trasladarse. Similarmente, las industrias del deporte y entretenimiento sufrieron la cancelación masiva de eventos, en algunos casos postergándolos para el año siguiente [32, 35].

Por todo lo anterior se han creado diversos modelos de toma de decisiones para ayudar durante una pandemia. Por ejemplo, la localización y asignación de ambulancias es un problema que se presenta no solo durante contingencias sanitarias sino también es de gran utilidad para situaciones de emergencia durante accidentes viales de grandes proporciones [22, 34]. Otro problema similar es el de la asignación de personal médico y pacientes durante desastres naturales, brotes epidemiológicos o pandemias [42, 3].

1.1 OBJETIVO

Con el objetivo de brindar apoyo en el proceso de toma de decisiones, y con la intención de mitigar la propagación del Covid–19, se ha decidido abordar una problemática relacionada con la estrategia de proveer un servicio a domicilio tercerizado para la realización de las pruebas Covid–19 en la comunidad del área metropolitana de Monterrey. Con esto se busca mitigar la propagación del virus y acortar la duración de crisis debido a la pandemia.

1.2 HIPÓTESIS

El estado de Nuevo León ha habilitado diferentes centros médicos para la detección del coronavirus, algunos de los cuales cuentan con servicio a domicilio para la realización de la prueba. Para una oportuna y temprana detección del Covid–19 se propone aumentar

el número de pruebas a domicilio, siendo estas tercerizadas en aquellos centros médicos que no cuentan con la facilidad de servicio a domicilio. Además, se desea ubicar bases de unidades móviles para el servicio a domicilio en zonas con gran concentración de posibles casos de infección. Posteriormente, las pruebas se transportarán a los centros médicos para su evaluación.

1.3 MOTIVACIÓN

Una de las principales motivaciones de esta investigación es brindar soluciones en donde se ayude a disminuir la propagación del virus evitando que las personas posiblemente infectadas salgan de sus domicilios y puedan esparcir el virus. Para aplicar esta investigación se necesitaría de la cooperación del gobierno del estado y de la ciudadanía al no salir de casa.

1.4 ESTRUCTURA

La estructura de la tesis es la siguiente: en el capítulo 2 se presenta una revisión de literatura dividida en tres partes de acuerdo al contexto del problema. Después, en el capítulo 3 se da formalmente la definición del problema y en el capítulo 4 se muestra la modelación matemática del mismo. Posteriormente, en el capítulo 5 con la finalidad de plantear un caso de estudio fidedigno y práctico con dimensiones y datos reales se recaba información de los diferentes centros médicos, de servicios de unidades móviles y de los posibles puntos de infección en el área metropolitana de Monterrey.

Además, en el capítulo 6 se realiza la experimentación del modelo propuesto. Asimismo, se analizan y se desglosan los resultados obtenidos durante el capítulo. Por último, en el capítulo 7 se muestran las conclusiones y algunas recomendaciones basadas en la solución óptima del modelo.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DE LITERATURA

Debido al contexto de nuestro problema, hacemos una revisión de literatura dividida en tres partes. La primera es enfocada en los modelos de localización y asignación para servicios de ambulancias; la segunda es para modelos de localización de instalaciones relacionadas con servicios de salud; y la última es para modelos de localización y asignación durante diferentes eventos de gran escala.

2.1 MODELOS DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN PARA SERVICIOS DE AMBULANCIAS

Una de las situaciones relacionadas con los servicios de ambulancia que han sido más estudiadas es para su asignación óptima. En Henderson and Mason (2005) se aborda este tema, así como las rutas de acceso y tiempo de traslado. Se presenta una simulación real con datos recabados por el servicio de ambulancias de St. John en la región de Auckland, Nueva Zelanda, utilizando un modelo de simulación y teoría de colas. También crea una herramienta de simulación para mejorar los tiempos de respuesta.

El tiempo de arribo al lugar del accidente es de gran importancia, pero en ciudades muy pobladas se complica. Aringhieri et al. (2007) abordan esta problemática al ubicar puestos de ambulancias en el área urbana de Milán, ya que el servicio de emergencia no puede atender todas las llamadas recibidas. Diseñan un modelo de programación lineal entera donde se minimiza el número de ambulancias utilizadas. Además, realizan una simulación y un caso de estudio en conjunto con el Servicio Médico de Emergencia oficial del área urbana de Milán, Italia.

Por otra parte, Ortega et al. (2007) toman en cuenta el tiempo de arribo al lugar del accidente, el tiempo de traslado hacia un hospital, y el tiempo en desocuparse una

ambulancia. El objetivo es minimizar el tiempo de arribo de una ambulancia a través de un modelo de programación lineal evaluado por medio de una simulación que considera estocasticidad en ciertos parámetros pre-especificados.

Otra consideración relevante es la gravedad de la emergencia, ya sea la gravedad del accidente o la gravedad el paciente, para ello Gendreau et al. (2001) proponen distribuir y redistribuir las ambulancias conforme la gravedad de la llamada de emergencia. Es decir, si una ambulancia asignada a una llamada menos urgente puede reasignarse a una llamada urgente, lo hará siempre y cuando sea la ambulancia más cercana y exista alguna otra capaz de cubrir la llamada menos urgente dentro del tiempo restante. Para resolver este problema se plantea un modelo dinámico y se diseña una heurística paralela basada en búsqueda tabú. Además, utilizan datos reales para analizar un caso de estudio de Montreal.

Algo similar ocurre en la investigación de Andersson and Värbrand (2007), ya que encuentran una medida cualitativa que ayuda a determinar la gravedad de la llamada de emergencia para enviar o reubicar ambulancias en una misma zona. Consideran un modelo dinámico de reubicación de ambulancias que minimiza el tiempo máximo de viaje. Realizan una heurística de búsqueda mediante un árbol y simulación con datos del SOS Alarm AB de Estocolmo, Suecia.

Por su parte, Villegas et al. (2012) proponen localizar ambulancias para la atención prehospitalaria durante accidentes. Utilizan dos modelos, el primero de localización de máxima cobertura esperada, donde pretenden obtener el número óptimo de ambulancias que se deben utilizar, y en el segundo modelo combinan los problemas de localización de máxima cobertura esperada y el de localización por cobertura de conjuntos. Además, presentan un caso de estudio con la información proporcionada por el Número Único de Atención de Emergencias 123 de la ciudad de Medellín.

En comparación con los trabajos anteriores, Yin and Mu (2012) proponen ubicar vehículos de emergencia tomando en cuenta dos situaciones, fijar el número de instalaciones y no fijar el número de instalaciones a ubicar. Plantean un problema de localización de máxima cobertura modular capacitado (MCMCLP) en dos variantes, MCMCLP-restricción–instalación y MCMCLP–no–restricción–instalación, mostrando un caso real donde ubican ambulancias en la Región 10 de Servicios Médicos de Emergencia en el Es-

tado de Georgia.

Similarmente, Hatta et al. (2013) estudian la importancia de ubicación de las ambulancias. Desarrollan un problema de localización de máxima cobertura para optimizar la cobertura de la demanda total de las ambulancias con un algoritmo basado en optimización de enjambre de partículas.

Otro punto a investigar es la cobertura de los sistemas de ambulancia. Por ejemplo, Revelle and Snyder (1995) discuten la manera en que los sistemas emergencia (ambulancias y bomberos), en ocasiones, ubican las ambulancias en la misma instalación que los bomberos. Proponen ubicar estaciones de ambulancias independientes de las estaciones de bomberos para una mayor cobertura. Para esto diseñan un modelo multiobjetivo que combina el problema de localización de máxima cobertura para ubicar las ambulancias y el problema de localización de equipo (Facility Location–Equipment Emplacement Technique) para la ubicación del servicio de bomberos. El objetivo es maximizar la cobertura de ambulancias y de bomberos.

En general, Brotcorne et al. (2003) proveen una revisión de literatura de la evolución de los modelos de ubicación y reubicación de ambulancias en los últimos 30 años. Muestran los tres tipos de modelos utilizados, modelos estáticos deterministas, modelos estáticos probabilísticos y modelos dinámicos. También se enlistan las técnicas y problemas más empleados, por ejemplo, el modelo de localización de conjunto de cobertura, el de localización de máxima cobertura, el de localización de máxima cobertura esperada, entre otros.

A continuación, se presenta la Tabla 1 con el resumen de las características de los artículos más relevantes para nuestra investigación que abordan los problemas de localización y asignación de ambulancias.

Referencias	Contexto específico	Descripción	Objetivo	Modelo	Método de solución	Caso de estudio
Andersson and Värbrand (2007)	Servicios logísticos de ambulancia	Reubicación dinámica y el envío automático de ambulancias	Minimiza el tiempo máximo de viaje	Modelo dinámico	Heurística de búsqueda de árbol y simulación	SOS Alarm AB de Estocolmo, Suecia
Aringhieri et al. (2007)	Sistema de Servicio de Emergencias Médicas	Encontrar nuevas ubicaciones de servicio de emergencias médicas	Minimiza el número de ambulancias	Modelo de programación lineal entera	Optimizador y simulación	Servicio de Emergencias Médicas oficial del área urbana de Milán, Italia
Gendreau et al. (2001)	Servicio de ambulancias	Asignación y reasignación de ambulancias en tiempo real	Maximiza la demanda cubierta	Modelo dinámico	Heurística de búsqueda tabú paralela, optimizador y simulación	Urgences Santé, Montreal
Hatta et al. (2013)	Servicio de Emergencias Médicas	Ubicar de ambulancias	Maximiza la cobertura de la demanda total de las ambulancias	Modelo de programación lineal entera 0-1	Algoritmo PSO y optimizador	N. A.
Henderson and Matheson (2005)	Servicio de ambulancias	Calcular los tiempos de viaje y rutas más cortas para ambulancias	Minimiza tiempo de viaje	Modelo de simulación y teoría de colas	Optimizador y simulación	Región de Auckland, Nueva Zelanda, St. Johns
Ortega et al. (2007)	Servicio de ambulancias durante accidentes	Localizar y determinar la zona de movilidad de las ambulancias y de la planeación del sistema	Minimiza la distancia media o el tiempo de arribo	Modelo de programación lineal	Optimizador y simulación	N. A.
Revelle and Snyder (1995)	Sistema de emergencia	Ubicar estaciones de ambulancias independientes a las estaciones de bomberos	Maximiza la cobertura de ambulancias como de bomberos	Modelo multiobjetivo	Optimizador	N. A.
Villegas et al. (2012)	Servicio de ambulancias de atención prehospitalaria	Calcular la cantidad de ambulancias y mejorar la cobertura del servicio de acuerdo con la distribución geográfica	Maximiza la cobertura esperada y el número de ambulancias, minimiza el número de bases abiertas	Modelo de programación lineal entera	Optimizador	Servicio de ambulancias de la ciudad de Medellín
Yin and Mu (2012)	Vehículos de emergencia	Ubicar vehículos de emergencia para dos situaciones, para instalaciones fijas y no fijas	Maximiza las demandas asignadas cubiertas y minimiza la distancia total entre las demandas asignadas no cubiertas	Modelo de programación lineal entera mixta	Optimizador	Región 10 de EMS en el Estado de Georgia

Tabla 1: Modelos de localización y asignación para servicios de ambulancias.

N.A. = No aplica

2.2 MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES RELACIONADAS CON SERVICIOS DE SALUD

Cuando se planea ubicar instalaciones relacionadas con servicios de salud, se involucran a diversos factores en diferentes ámbitos. Por ejemplo, cuestiones sociales, económicas o políticas. Calvo and Marks (1973) toman en cuenta estos aspectos y proponen un modelo multiobjetivo de programación lineal entera para minimizar el tiempo de viaje y el costo de usuario; además de maximizar la demanda y la utilidad, simultáneamente.

De una manera similar, Marianov and Taborga (2001) buscan ubicar centros públicos de salud que brinden servicios no vitales para pacientes de bajos ingresos y, al mismo tiempo, a pacientes de altos ingresos los cuales puedan patrocinar el centro de salud. Para plantear el problema, recurrieron a un modelo de localización de máxima cobertura, en donde se maximiza la cobertura de la población de bajos ingresos y a la población de altos ingresos que puede ser atendida en dichos centros. Emplean datos de la ciudad de Santiago, Chile a través de un algoritmo exacto de ramificación y acotamiento y de un algoritmo heurístico.

Por otro lado, Khodaparasti et al. (2017) tratan de ubicar estratégicamente instalaciones de salud. En específico, organizaciones de salud comunitarias con objetivos como accesibilidad, eficiencia y equidad, todo esto en un área geográfica definida. Proponen un modelo de localización y asignación jerárquica multiobjetivo para minimizar la distancia total recorrida entre las instalaciones del primer y segundo nivel, para minimizar la puntuación total de ineficiencia de las instalaciones del segundo nivel, y para buscar que la diferencia entre la distancia máxima de cualquier par de instalaciones del mismo servicio del primer y segundo nivel y la distancia mínima de cualquier par de instalaciones del primer nivel sea la menor posible. También presentan un caso real con las organizaciones de salud comunitarias de la ciudad de Shiraz, provincia de Fars, Irán.

Polo et al. (2015) abordan la problemática de cómo los servicios de salud pública se ven ayudados por sistemas de información geográfica. En particular, debido a la accesibilidad y disponibilidad de dichos sitios de salud. Presentan un caso para el programa público de esterilización de perros y gatos de Bogotá, Colombia. En dicha investigación buscan mejorar la accesibilidad reubicando los sitios de esterilización mediante dos modelos, el modelo de la p -mediana y el de demanda finita.

Retomando el tema de las instalaciones referentes a cuestiones de salud, Jánošíková (2009) describe el diseño de una red hospitalaria que pretende ubicar hospitales y cerrar otros con el propósito de brindar un servicio de alta calidad cumpliendo varios criterios muy rigurosos. Específicamente, se enfoca en los criterios de calidad, complejidad, accesibilidad de transporte y distribución equitativa de los hospitales entre los ciudadanos. Formula un problema de localización multicriterio que maximiza la calidad y la complejidad de los hospitales, y minimiza el tiempo de viaje al hospital más cercano junto con la distribución equitativa de los hospitales. Aborda un caso de estudio en la República Eslovaca.

Por su parte, Murawski and Church (2009) buscan la accesibilidad a instalaciones de salud en áreas rurales de países menos desarrollados. Para el planteamiento toman en cuenta la falta de carreteras o las condiciones de ellas. Formulan un modelo de programación lineal entero para el problema de mejora de la red de cobertura máxima. Además, muestran un caso de estudio en Suhum, distrito de Ghana.

En comparación, Rahman and Smith (2000) hacen una revisión de artículos relacionados con problemas de localización y asignación de servicios de salud en países en desarrollo. Presentan los modelos de localización más utilizados por los diferentes autores, por ejemplo, el de la p -mediana, el de máxima cobertura y el de conjunto de cobertura.

A diferencia de los otros trabajos, Gu et al. (2010) analizan una problemática de los servicios de salud preventiva. Una de las características es que las personas no buscan el centro de atención médica preventiva más cercano, sino que eligen el más cercano debido a su conveniencia. Plantean un modelo biobjetivo, donde primero calculan la accesibilidad de los servicios de salud preventiva y después maximizan la eficiencia y cobertura de estos. Utilizan un algoritmo basado en intercambios para resolver el problema y presentan un caso real en el programa de detección del cáncer de mama en Alberta, Canadá.

También debemos tomar en cuenta que en ocasiones los servicios de emergencia médica tienen prioridad para atender a unos pacientes sobre otros, ya sea porque un tratamiento es de vital importancia o porque el otro se puede retrasar, lo cual genera colas de espera. Para ello, Silva and Serra (2008) proponen un problema de cobertura con colas de prioridad para ubicar instalaciones y priorizar las llamadas de servicio, maximizando la población cubierta en todas las prioridades. El modelo se resuelve con ayuda de una

metaheurística GRASP.

Por último, otro enfoque puede ser para la reasignación de instalaciones de salud. Bajo este enfoque, Mitropoulos et al. (2006) realizan una reasignación de hospitales y centros de atención primaria de salud. Proponen un modelo biobjetivo de programación mixto entero, donde el primer objetivo busca minimizar la distancia total ponderada de viaje desde los centros de población a las instalaciones de atención médica. En el segundo objetivo se utiliza un enfoque minmax para la minimización de la distancia máxima de los centros de población a las instalaciones médicas. Al final, incluyen un caso de estudio en las instalaciones sanitarias de Acaya, región de Grecia occidental.

En la Tabla 2 se presentan los datos más relevantes de algunos de los artículos seleccionados para nuestra investigación referentes a los problemas de localización de instalaciones relacionadas con servicios de salud.

Referencias	Contexto específico	Descripción	Objetivo	Modelo	Método de solución	Caso de estudio
Calvo and Marks (1973)	Instalaciones de atención médica	Calcular la distancia o tiempo de viaje a una instalación, costos de usuario (costos de servicio y transporte), demanda del servicio	Minimiza la distancia o tiempo de viaje y costos de usuario. Maximiza la demanda y utilidad	Modelo multiobjetivo de programación lineal entera	Branch and Bound heurísticas	N. A.
Gu et al. (2010)	Instalaciones de atención médica preventiva	Calcular la accesibilidad de los servicios de salud preventiva	Maximiza la eficiencia. Maximiza la cobertura	Modelo biobjetivo	Algoritmo de intercambio y optimizador	Programa de detección del cáncer de mama en Alberta, Canadá
Jánošíková (2009)	Red hospitalaria	Ubicar y cerrar hospitales	Maximiza la calidad y la complejidad de los hospitales. Minimiza el tiempo de viaje al hospital más cercano y la distribución equitativa de los hospitales	Modelo de localización multicriterio	Optimizador	República Eslovaca
Khodaparasti et al. (2017)	Organizaciones de salud comunitarias	Ubicar y asignar estratégicamente las organizaciones de salud comunitarias	Minimiza la distancia total recorrida. Minimiza la puntuación total de ineficiencia. Minimiza la diferencia entre la distancia máxima y la distancia mínima de cualquier par de instalaciones	Modelo multiobjetivo jerárquico	Optimizador	Organizaciones de salud comunitarias de Shiraz, provincia de Fars, Irán
Marianov and Taborga (2001)	Centros de salud pública	Ubicar centros de salud pública	Maximiza la cobertura de la población de bajos ingresos. Maximiza la población de altos ingresos	Modelo de programación lineal entera 0-1	Branch and Bound, heurísticas y optimizador	Santiago, Chile
Mitropoulos et al. (2006)	Reasignación de instalaciones médicas	Reasignar hospitales y centros de atención primaria de salud que satisfagan la demanda	Minimiza la distancia entre pacientes e instalaciones. Minimiza la distancia máxima de los centros de población a las instalaciones médicas	Modelo biobjetivo	Optimizador	Instalaciones sanitarias de Acaya, región de Grecia occidental
Murawski and Church (2009)	Accesibilidad a las instalaciones de salud	Mejorar el acceso a los servicios de salud	Maximiza el número de personas a las que cubre	Modelo de programación lineal entera	Optimizador	Suhum, distrito de Ghana
Polo et al. (2015)	Servicios de salud pública	Mejorar la accesibilidad y disponibilidad de sitios de salud	Maximiza la accesibilidad al servicio de esterilización	Modelos de programación lineal entera 0-1	Optimizador	Programa público de esterilización de perros y gatos de Bogotá, Colombia
Silva and Serra (2008)	Servicios de emergencia médica	Ubicar instalaciones y prioridades de los servicios de salud	Maximiza la población cubierta en todas las prioridades	Modelos de programación lineal entera 0-1	Metaheurística GRASP	N. A.

Tabla 2: Modelos de localización de instalaciones relacionadas con servicios de salud.
N.A. = No aplica

2.3 MODELOS DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DURANTE DIFERENTES EVENTOS DE GRAN ESCALA

Esta sección incluye trabajos en diferentes contextos los cuales han sido tomados en cuenta debido a la importancia que le dieron al tiempo de respuesta o por la capacidad de reacción en situaciones de gran escala. Estos pueden ser eventos epidemiológicos, pandemias o desastres ya sean naturales u ocasionados por el hombre. Al igual que en las secciones anteriores se estudian los servicios de ambulancia y de instalaciones de salud, pero también abarcan más temas como lo son la asignación de recursos o costos.

Durante los brotes epidemiológicos o pandemias la distribución de suministros, personal médico, equipo e instalaciones de salud y de emergencia son recursos de gran relevancia para respuesta oportuna. Anparasan and Lejeune (2018) proponen un modelo de programación entera para la distribución de suministros (para personal médico, equipo e instalaciones) y traslado de pacientes considerando un tiempo de espera durante el brote. En especial, realizan una base de datos para países en desarrollo que no cuentan con ella durante brote epidemiológico, en específico para Haití, la cual pretende ayudar a diversos investigadores para su estudio en el contexto que sea útil.

Además de la distribución de recursos, el tiempo de viaje a instalaciones de salud son temas importantes. Sun et al. (2014) se enfocan en estas situaciones y muestran un problema multiobjetivo donde consideran una red de hospitales y desean minimizar la distancia total de viaje de los pacientes a los hospitales y la distancia máxima de viaje de un paciente a un hospital, además de asignar recursos hospitalarios, como lo son equipo y personal médico durante un brote de influenza pandémica. Por último, incluyen un caso de estudio en Louisville, Kentucky.

Por su parte, Paul and Batta (2008) trabajan con la ubicación de hospitales y asignación de capacidad durante desastres naturales. Presentan dos modelos, el primero busca ubicar hospitales y asignar capacidades para reducir la distancia media de viaje de los pacientes a los hospitales, mientras que el segundo reasigna la capacidad entre los hospitales buscando minimizar la distancia media recorrida por un paciente hasta su hospital más cercano y el costo del reajuste de capacidad en sí. Utilizan un algoritmo heurístico para resolver los modelos y muestran dos casos de estudio: uno basado en los terremotos de Northridge, California y otro de los huracanes en Nueva Orleans.

En cambio, Aghamohammadi et al. (2013) centran su investigación en desastres ocasionados por terremotos. En detalle, se interesan en la reducción del tiempo de las operaciones de socorro, la ubicación de centros médicos, el traslado de las personas heridas, etc. Implementan modelos de programación lineal entera 0–1 utilizando una heurística basada en dos algoritmos genéticos anidados para la ubicación y la asignación de recursos, pretendiendo minimizar el tiempo total de traslado de las víctimas a los centros médicos nuevos y disponibles. Además, utilizan el Sistema de Información Geográfica como ayuda en un caso de estudio en la parte central de la región no. 17 de Teherán, Irán.

De manera similar, Aydin (2016) plantean casos de posibles escenarios de terremoto en Zeytinburnu, Estambul creando hospitales provicionales para después del terremoto. Desea ubicar un número óptimo de hospitales y asignar a las víctimas a los hospitales provicionales. Formulan un modelo estocástico de dos etapas, el cual minimiza la distancia total recorrida por las víctimas.

Durante eventos inesperados, como lo son las enfermedades impredecibles, en donde se requiere una rápida atención, los servicios de socorro son empleados para la ubicación y asignación de las instalaciones y vehículos de emergencia. Babaei and Shahanaghi (2017) diseñan un modelo multiobjetivo para esta situación. Consideran instalaciones de distribución y accesibilidad a los recursos de socorro, además de satisfacer la demanda con lógica difusa. Emplean un algoritmo NSGA–II para obtener una frontera de soluciones eficientes, donde minimizan la pérdida o los costos logísticos del suministro compensatorio, aumentan la demanda sin retrasos, además del presupuesto y la cantidad de respuesta a la demanda.

Algunos otros autores, como Jia et al. (2007), realizan una revisión de los modelos tradicionales de ubicación de instalaciones de servicios médicos de emergencia. A partir de estos modelos diseñan un modelo general para ubicar instalaciones en situaciones de gran escala. El modelo propuesto es la generalización de los modelos de cobertura, p –mediana y p –centro, con una función objetivo que puede generalizarse para diversos escenarios específicos. Además, realizaron casos de estudio para cada modelo en el área de Los Ángeles.

Por último, en la Tabla 3 se muestran las ideas más destacables de los artículos elegidos para nuestra investigación que tratan los problemas de localización y asignación durante diferentes eventos de gran escala.

Referencias	Contexto específico	Descripción	Objetivo	Modelo	Método de solución	Caso de estudio
Aghamohammadi et al. (2013)	Desastres por terremotos	Ubicar centros médicos, reducir tiempo de la operación de socorro y asignar recursos	Minimiza el tiempo total de traslado de las víctimas a los centros médicos nuevos y posibles	Modelo de programación lineal entera 0-1	Heurística y optimizador	Parte central de la región no. 17 de Teherán, Irán
Anparasan and Lejeune (2018)	Brote epidemiológico de cólera	Distribuir suministros (personal médico, equipo e instalaciones), tiempo de espera de pacientes	Maximiza el número de pacientes transportados	Modelo de programación lineal entera	Optimizador	Haití
Aydin (2016)	Terremotos	Determinar el número óptimo y la ubicación de hospitales provisionales	Minimiza la distancia total recorrida por las víctimas	Modelo estocástico de dos etapas	Optimizador	Zeytinburnu, Estambul
Babaei and Shahnaghi (2017)	Servicios de socorro	Ubicar instalaciones de distribución de recursos de socorro	Minimiza la pérdida o los costos logísticos del suministro compensatorio. Aumenta la demanda sin retrasos. Aumento del presupuesto y la cantidad de respuesta a la demanda	Modelo multiobjetivo	Algoritmo NSGA-II	N.A.
Paul and Battu (2008)	Desastres naturales	Ubicar hospitales y asignar capacidad, reasignar capacidad entre los hospitales	Minimiza la distancia media de viaje de los pacientes a los hospitales, y el distancia media de viaje y coste de reajuste	Modelo de programación lineal entera mixta	Heurística y optimizador	Terremotos de Northridge, California y huracanes en Nueva Orleans
Sun et al. (2014)	Brote de influenza pandémica	Asignación de pacientes y recursos entre hospitales	Minimiza la distancia total de viaje de los pacientes a los hospitales. Minimiza la distancia máxima que viaja un paciente a un hospital	Modelo multiobjetivo	Optimizador	Metro de Louisville, Kentucky

Tabla 3: Modelos de localización y asignación durante diferentes eventos de gran escala.

N.A. = No aplica

CAPÍTULO 3

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Ante la contingencia generada por la pandemia del Covid–19 en el estado de Nuevo León, se han habilitado centros de salud, hospitales, laboratorios, unidades médicas y módulos drive–thru para la detección del virus en diferentes puntos de la ciudad. Con la intención de mitigar la propagación del Covid–19 y evitar la interacción con la comunidad, algunos laboratorios y hospitales han decidido brindar servicio a domicilio para la realización de la prueba Covid–19, siendo el equipo médico de estos hospitales y laboratorios los que realizan esta actividad.

Para una oportuna y temprana detección del virus se propone aumentar el número de pruebas a domicilio, siendo estas tercerizadas en aquellos centros médicos que no cuentan con la facilidad de servicio a domicilio. Además, se desea ubicar bases para el servicio a domicilio en zonas con gran concentración de posibles casos de infección, las cuales contarán con un radio de cobertura predefinido. Las bases estarán esperando el llamado de una persona posiblemente infectada desde un punto de infección para la realización de la prueba. Después esta se transportará a los centros médicos para su evaluación.

CAPÍTULO 4

MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para describir la situación recién descrita considere los siguientes conjuntos:

- $I = \{1, \dots, a\}$ el conjunto de sitios potenciales para ubicar una base,
 $J = \{1, \dots, b\}$ el conjunto de los posibles puntos de infección,
 $K = \{1, \dots, c\}$ el conjunto de los centros médicos,
 $S = \{1, \dots, q\}$ el conjunto de los diferentes tipos de unidades móviles de atención disponibles.

Además, se cuenta con los siguientes parámetros:

- d_j número de posibles infectados en un posible punto de infección $j \in J$
 t^0 tiempo en realizar una prueba a una persona del posible punto de infección $j \in J$
 t_{ijs}^1 tiempo de ir de la base $i \in I$ a un posible punto de infección $j \in J$ en el tipo de unidad móvil $s \in S$
 t_{jks}^2 tiempo de ir de un posible punto de infección $j \in J$ al centro médico $k \in K$ en el tipo de unidad móvil $s \in S$
 t_{kis}^3 tiempo de ir del centro médico $k \in K$ a la base $i \in I$ en el tipo de unidad móvil $s \in S$
 r_s radio de cobertura del tipo de unidad móvil $s \in S$
 n_s cantidad de unidades móviles de atención que se tiene por cada tipo de unidad móvil de atención $s \in S$

También se tienen los siguientes conjuntos auxiliares:

El conjunto de las bases $i \in I$ que pueden cubrir a los posibles puntos de infección $j \in J$ con el tipo de unidad móvil $s \in S$:

$$I(j, s) = \{i \in I : t_{ijs}^1 \leq r_s\} \quad \forall \quad j \in J, s \in S$$

El conjunto de los posibles puntos de infección $j \in J$ que pueden ser cubiertos desde la base $i \in I$ con el tipo de unidad móvil $s \in S$:

$$J(i, s) = \{j \in J : t_{ijs}^1 \leq r_s\} \quad \forall \quad i \in I, s \in S$$

El conjunto de los centros médicos $k \in K$ que pueden atender a un posible punto de infección $j \in J$ con el tipo de unidad móvil $s \in S$:

$$K(j, s) = \{k \in K : t_{jks}^2 \leq r_s\} \quad \forall \quad j \in J, s \in S$$

El conjunto de las unidades móviles de atención que se tienen de cada tipo $s \in S$:

$$V(s) = \{1, \dots, n_s\} \quad \forall \quad s \in S$$

Y las siguientes variables de decisión:

$$x_{vsi} = \begin{cases} 1, & \text{si la unidad móvil de atención } v \in V(s) \text{ del tipo } s \in S \text{ se asigna a la} \\ & \text{base } i \in I \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$y_{vsij} = \begin{cases} 1, & \text{si la unidad móvil de atención } v \in V(s) \text{ del tipo } s \in S \text{ de la base } i \in I \\ & \text{asiste al posible punto de infección } j \in J \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$z_{vsijk} = \begin{cases} 1, & \text{si la unidad móvil de atención } v \in V(s) \text{ del tipo } s \in S \text{ de la base } i \in I \\ & \text{transporta la prueba de una persona de un posible punto de infección} \\ & j \in J \text{ al centro médico } k \in K \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El modelo matemático resultante es el siguiente problema de programación binaria:

$$\min \quad t^0 \sum_{j \in J} d_j + \sum_{s \in S} \sum_{v \in V(s)} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I(j,s)} \sum_{k \in K(j,s)} (t_{ijs}^1 + t_{jks}^2 + t_{kis}^3) z_{vsijk} \quad (4.1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in I} x_{vsi} = 1 \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s) \quad (4.2)$$

$$y_{vsij} \leq x_{vsi} \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s), j \in J, i \in I(j, s) \quad (4.3)$$

$$\sum_{k \in K(j,s)} z_{vsijk} = y_{vsij} \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s), j \in J, i \in I(j, s) \quad (4.4)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{v \in V(s)} \sum_{i \in I(j,s)} y_{vsij} = 1 \quad \forall \quad j \in J \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in J(i,s)} \sum_{k \in K(j,s)} z_{vsijk} \geq x_{vsi} \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s), i \in I \quad (4.6)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{v \in V(s)} \sum_{i \in I(j,s)} \sum_{k \in K(j,s)} z_{vsijk} = 1 \quad \forall \quad j \in J \quad (4.7)$$

$$x_{vsi} \in \{0, 1\} \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s), i \in I \quad (4.8)$$

$$y_{vsij} \in \{0, 1\} \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s), i \in I, j \in J \quad (4.9)$$

$$z_{vsijk} \in \{0, 1\} \quad \forall \quad s \in S, v \in V(s), i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.10)$$

Donde la Ec. (4.1) representa la función objetivo y busca minimizar el tiempo total de realizar una prueba y trasladarla a un centro médico. En la restricción (4.2) se garantiza que una unidad móvil que brinda atención se asigne únicamente a una base. Las restricciones (4.3) y (4.4) están ligadas entre sí, y están enfocadas a la realización de las pruebas in situ. En la Ec. (4.3) se restringe la cobertura de los posibles puntos de infección dependiendo de las unidades móviles de atención ubicadas en las bases; similarmente, en la Ec. (4.4) se delimita la cobertura de los posibles puntos de infección por un centro médico.

La Ec. (4.5) menciona que solo una unidad móvil de atención puede atender un punto de infección. En la Ec. (4.6) se garantiza que las unidades móviles de atención ubicadas atiendan cuando menos un llamado de algún centro médico para algún posible punto de infección. En la restricción (4.7) se asegura recolectar todas las pruebas realizadas para transportarlas a un centro médico. Por último, en las Ec. (4.8)–(4.10) se indica la naturaleza binaria de las variables de decisión.

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO

Con la finalidad de plantear un caso de estudio fidedigno se crearon cuatro instancias reales con la información recabada de diferentes centros médicos, servicios de unidades móviles y de los posibles puntos de infección en el área metropolitana de Monterrey.

Para su elaboración primero fue necesario construir las diferentes bases de datos. En cuanto a la base de datos de los sitios potenciales para ubicar las bases de las unidades móviles de atención se investigó los servicios de ambulancias privados y públicos existentes en el área metropolitana de Monterrey, siendo seleccionados aquellos que presentaron información confiable y contaban con un historial de servicio. Además, para obtener las coordenadas de los diferentes servicios, incluyendo sus sucursales, se utilizó la aplicación de Google Maps, obteniendo así un total de 21 sitios potenciales para la ubicación de las bases de unidades móviles de atención como se muestra en la Figura 1. Se debe resaltar que en la Figura 1 se muestra el área urbana de la zona metropolitana y no la extensión real de los municipios.

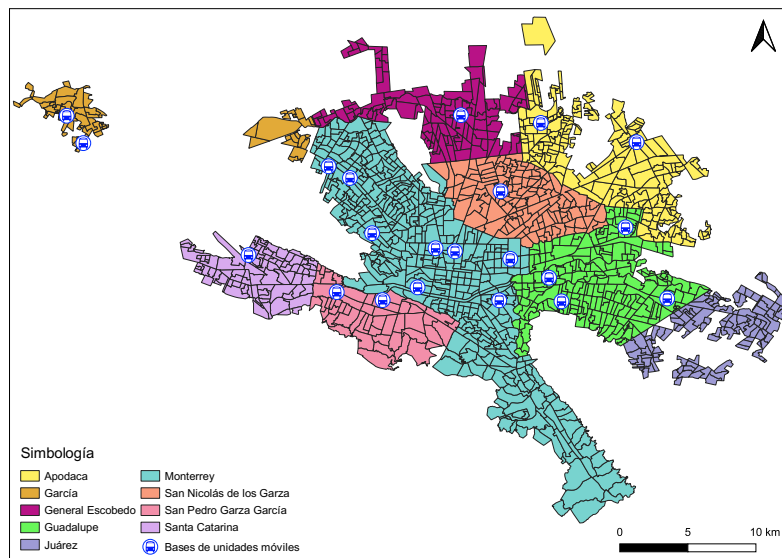


Figura 1: Bases de unidades móviles de atención.

Para la base de datos de los centros médicos (ver Figura 2), se tomaron en cuenta todos los establecimientos que realizaron pruebas Covid–19, ya sean laboratorios, hospitales públicos y privados, incluyendo sus sucursales, además de centros de salud, a excepción de los módulos drive–thru, pues estos requieren ir personalmente. La información de los centros médicos se obtuvo de las páginas oficiales del estado de Nuevo León [17, 16, 15], así como de los sitios webs de los laboratorios y hospitales de la zona metropolitana de Monterrey. Además, se estuvo actualizando la lista de los centros médicos basados en las conferencias ofrecidas por la Secretaria de Salud Pública del Estado. Al igual que las bases de unidades móviles las coordenadas se obtuvieron por la aplicación de Google Maps, consiguiendo un total de 62 centros médicos.

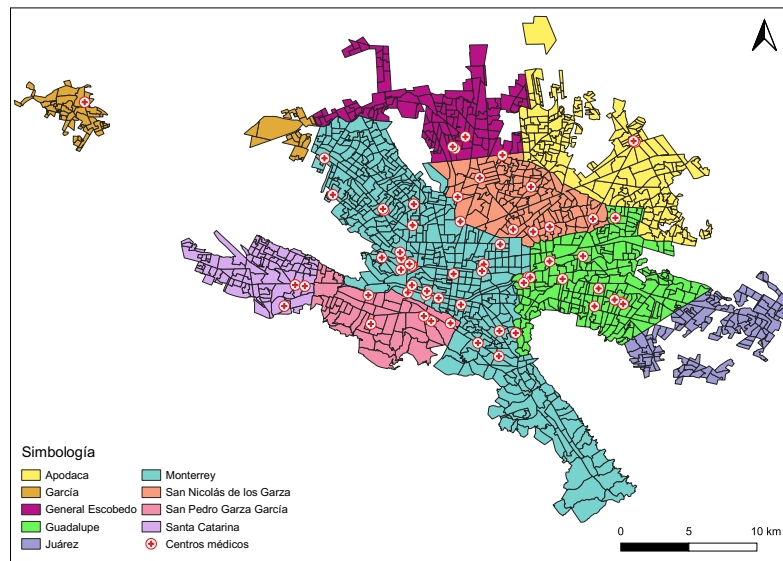


Figura 2: Centros médicos.

Respecto a las bases de datos de los posibles puntos de infección fueron creadas cuatro versiones para cada una de las instancias que se construyen. Tres de las cuales toman en cuenta un estudio realizado por Hernández (2020), donde muestra que el 71.2% de las muertes por Covid–19 en México, fueron personas que tenían como mayor grado de escolaridad la escuela básica, por ello consideramos todas las localidades de la zona metropolitana de Monterrey, las cuales presentan un mayor número de habitantes donde su grado máximo de escolaridad es la escuela básica.

La información se obtuvo de los “Datos Abiertos” del INEGI [13] de “Censos y Conteos de Población y Vivienda” del 2010 de “Principales resultados por AGEB y manzana urbana. Nuevo León”, donde se localizaron los municipios que conforman el área metropolitana de Monterrey. Estos fueron filtrados por AGEB para obtener la “Población de

15 años y más analfabeta”, “Población de 15 años y más sin escolaridad”, es decir, que son aquellas personas que no cuentan con ningún grado de escolaridad o que solo tienen el nivel de preescolar; además de “Población de 15 años y más con primaria incompleta”, y por último “Población de 15 años y más con primaria completa”. Todas estas secciones se sumaron para obtener un solo dato por AGEB que muestre a la población de 15 años o más con un máximo de escolaridad de primaria completa. De estos datos se obtuvo un promedio, el cual indica la cantidad de personas con máximo la primaria completa en promedio que debe de haber por AGEB, aquellos AGEBs que sobrepasan esta cantidad se consideran como un posible punto de infección.

Para obtener las coordenadas de los AGEB, se utilizaron archivos SHAPE [11] de la “Biblioteca digital de Mapas” del INEGI [12] para los mapas de los municipios de la zona metropolitana de Monterrey. Esos archivos son documentos electrónicos vectoriales conformados por puntos, líneas y áreas (polígonos). Para cada municipio se buscó información vectorial de localidades ameznadas y números exteriores, rurales y urbanas del cierre de planeación del Censo de Población y Vivienda 2010. Estos archivos fueron trabajados en el programa QGIS, donde se obtuvieron las coordenadas.

La primera instancia de estas tres se denomina “Instancia Este” (ver Figura 3), de acuerdo a que contiene los municipios de Apodaca, General Escobedo, Guadalupe, Juárez y San Nicolás de los Garza, que se encuentran situados en la zona Este del área metropolitana, contando con 299 posibles puntos de infección.

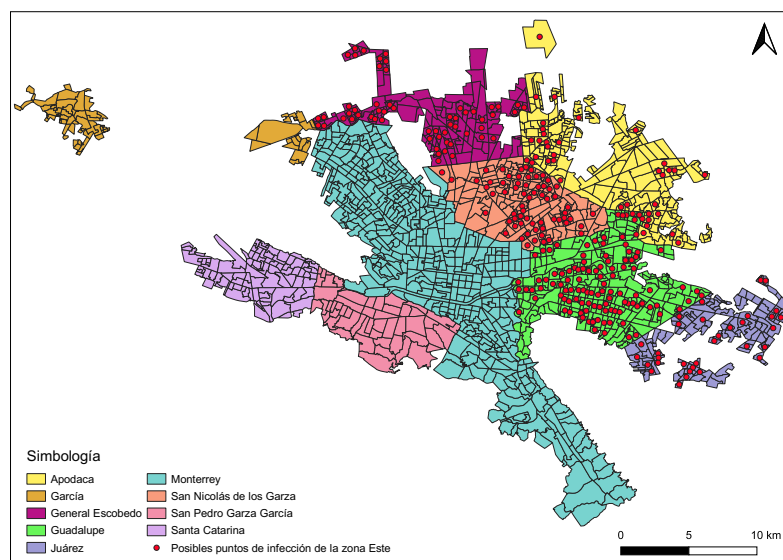


Figura 3: Posibles puntos de infección de la zona Este.

Similarmente, la segunda instancia se nombró “Instancia Oeste” (ver Figura 4) la cual está compuesta por los demás municipios restantes, es decir, García, Monterrey, San Pedro Garza García y Santa Catarina, mismos que se encuentran en la zona Oeste del área metropolitana, obteniendo 258 posibles puntos de infección.

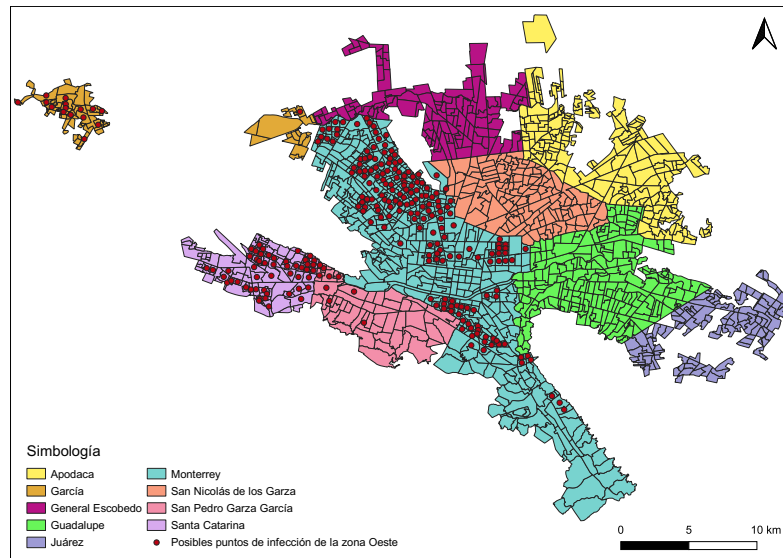


Figura 4: Posibles puntos de infección de la zona Oeste.

La tercera instancia y última de estas tres, incluye todos los municipios antes mencionados, es decir, el área metropolitana de Monterrey (ver Figura 5), nombrada de la misma forma: “Instancia Metropolitana”. Dicho esto, la suma de los posibles puntos de infección de ambas instancias da un total de 557 posibles puntos de infección.

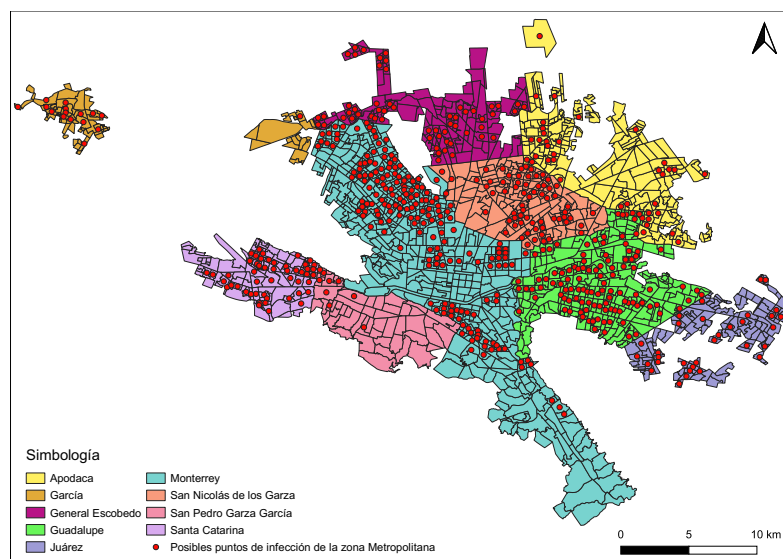


Figura 5: Posibles puntos de infección de la zona Metropolitana.

Las instancias se crearon de esta forma para ver cada uno de los casos particulares y a la vez poder tener contra quien comparar los resultados.

Por último, en la base de datos de la cuarta instancia nos enfocamos en las zonas rurales de los municipios del área metropolitana de Monterrey, motivo por el cual obtiene su nombre: “Instancia Rural” (ver Figura 6). La información se obtuvo del “Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades” del INEGI [14], donde los datos fueron filtrados primero por “Áreas Geoestadísticas Estatal” (AGEE) para las entidades federativas obteniendo la información del estado de Nuevo León, después por “Áreas Geoestadística Municipal” (AGEM) para los municipios de la zona metropolitana de Monterrey. Al final, se filtró por “Ámbito” para las zonas rurales de los AGEM seleccionados, contando aquellos donde al menos viva una persona. El archivo ya incluía las coordenadas de las zonas rurales de dichos municipios, obteniendo 293 posibles puntos de infección.

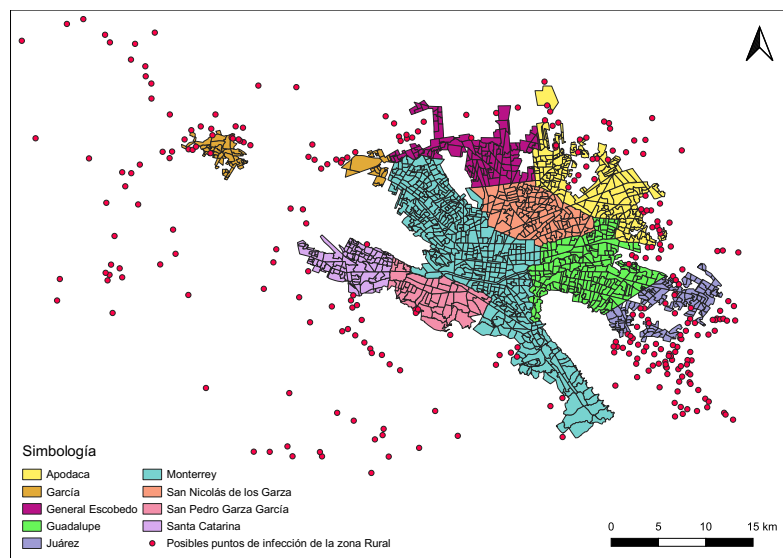


Figura 6: Posibles puntos de infección de la zona Rural.

Con las bases de datos creadas se programó un algoritmo en el software R Studio que fuera capaz de leer los datos de las bases de las unidades móviles, de los posibles puntos de infección y de los centros médicos. Además de identificar las distancias entre una base y un posible punto de infección, así como las distancias entre un posible punto de infección y un centro médico, y las distancias entre un centro médico y una base. Dicho algoritmo también calcula los radios de cobertura de los tipos de unidad móvil. Por último, imprime lo anteriormente descrito en un archivo de texto, el cual nos servirá como instancia para

el caso de estudio que consideramos en la experimentación computacional.

Las distancias fueron obtenidas a través de la fórmula Haversine [9], misma que determina la distancia de círculo máximo entre dos puntos en una esfera dado sus longitudes y latitudes. La razón por la cual se decidió utilizar esta fórmula es por la forma de la superficie terrestre. Dicha fórmula se describe de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Delta Lat &= lat1 - lat2 \\ \Delta Long &= long1 - long2 \\ a &= \sin^2\left(\frac{\Delta Lat}{2}\right) + \cos(lat1) * \cos(lat2) * \sin^2\left(\frac{\Delta Long}{2}\right) \\ d &= 2 * r * \arcsin(\sqrt{a})\end{aligned}$$

donde $r = 6371$ km es el radio medio de la Tierra, ΔLat es la diferencia de latitudes y $\Delta Long$ es la diferencia de longitudes.

Además, se definió el número de posibles infectados en cada posible punto de infección. En las tres instancias que se basan en el estudio realizado por Hernández (2020) se toma este número como la cantidad de personas en cada posible punto de infección que sobrepasó el promedio de personas con la primaria completa como mayor grado escolar. En el caso de la instancia Este, el número varía entre 418 a 2630; en la instancia Oeste dichos valores son entre 422 a 2718, y para la instancia Metropolitana esta cifra es entre 418 a 2718 infectados por punto de infección.

En cuanto al caso de la instancia Rural, el número fue otorgado por el “Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades” del INEGI [14], los cuales son entre 1 a 2391 infectados por punto de infección. Con respecto al tiempo en realizar la prueba a una persona del posible punto de infección es de 5 minutos, ya que en la realidad no se sobrepasa ese tiempo al tomar la muestra para realizar la prueba.

Por último, se fijó el radio de cobertura de acuerdo a cada tipo de unidad móvil, el cual fue generado como un promedio entre la distancia más grande y la más pequeña, según el tipo de unidad móvil y la instancia. Se debe resaltar que todas las instancias se crearon bajo el mismo procedimiento.

CAPÍTULO 6

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Toda la experimentación se realizó en un equipo con un procesador Inter Core i7–4790 de 3.60 GHz con 32.00 GB de RAM que funciona con el sistema operativo Windows 8.1 Pro con Media Center. Para la resolución de las instancias se decidió utilizar el software especializado en optimización FICO Xpress 8.4 obteniendo la solución óptima.

En la Tabla 4, se describen las dimensiones de cada una de las instancias; donde en la fila 1, se indica la cantidad de bases de unidades móviles de atención seleccionadas; en la fila 2, se muestra el número de posibles puntos de infección, y en la fila 3, se observa la cifra de centros médicos elegidos para cada instancia. Además, en la fila 4 se señala el tiempo en realizar la prueba a una persona de un posible punto de infección. Así como, en la fila 5 se muestra la cantidad de tipos de unidades móviles de atención. Se debe resaltar que todas las instancias tienen el mismo tiempo y la misma cantidad de tipos de unidades móviles. Por lo tanto, la fila 6 representa la cantidad de unidades móviles de tipo 1 y la fila 7 del tipo 2. Similarmente las filas 8 y 9 indican el radio de cobertura de los tipos 1 y 2 respectivamente.

Luego, en la fila 10 se muestra el número de personas en un posible punto de infección. En cuanto a las filas 11, 12 y 13 corresponden a las matrices de distancias 1, 2 y 3 referentes a el tiempo de ir de una base de unidad móvil a un posible punto de infección, al tiempo de ir de un posible punto de infección a un centro médico, y al tiempo de ir de un centro médico a una base de unidad móvil, respectivamente.

Con respecto a las columnas, la primera representa los datos de la instancia Este, la segunda los de la instancia Oeste, la tercera los de la Metropolitana, y la última los datos de la instancia Rural.

	Instancias			
	Este	Oeste	Metropolitana	Rural
Bases de unidades móviles de atención	8	13	21	12
Posibles puntos de infección	299	258	557	293
Centros médicos	25	37	62	16
Tiempo en realizar la prueba	5	5	5	5
Tipos de unidades móviles de atención	2	2	2	2
Unidades móviles del tipo 1	49	47	84	43
Unidades móviles del tipo 2	41	35	71	34
Radio de cobertura del tipo 1	7	9	6.5	14
Radio de cobertura del tipo 2	10	15	10	20
Personas por posible punto de infección	418 – 2630	422 – 2718	418 – 2718	1 – 2391
Matriz de distancia 1	8×299	13×258	21×557	12×293
Matriz de distancia 2	299×25	258×37	557×62	293×16
Matriz de distancia 3	25×8	37×13	62×21	16×12

Tabla 4: Dimensiones de las instancias.

Con la información anterior se resolvieron las cuatro instancias obteniendo la solución óptima. En la Tabla 5 se muestran las soluciones óptimas de cada una de las instancias, en la primera columna se indican los nombres de las instancias, en la segunda columna el valor óptimo de la función objetivo, es decir, el tiempo total de ir de una base a un punto de infección, de un punto de infección a un centro médico y del centro médico regresar a una base, más el tiempo de realizar la prueba en un punto de infección. Por último, en la tercera columna se presenta el tiempo de ejecución del modelo en segundos.

Instancia	Valor óptimo	Tiempo (seg)
Este	1,308,515.889	30.165
Oeste	1,222,995.028	77.983
Metropolitana	2,531,382.45	519.727
Rural	154,502.9424	16.049

Tabla 5: Valores óptimos y tiempos de respuesta.

6.1 RESULTADOS

Antes de abordar los resultados obtenidos durante la experimentación es necesario hacer los siguientes recordatorios:

- El radio de cobertura depende del tipo de unidad móvil, como en nuestro caso de estudio tenemos dos tipos de unidad móvil por lo tanto contamos con dos radios de cobertura, los cuales han sido definidos anteriormente como el promedio entre la distancia más grande y la más pequeña, además de ser diferente uno del otro, todo esto para cada instancia.
- Se puede asignar a una base de unidad móvil o centro médico varias unidades móviles del mismo tipo y de diferente tipo, es decir, en la misma base de unidad móvil o centro médico pueden coexistir varias unidades móviles del mismo tipo, por ejemplo, una unidad móvil del tipo 1 y otra del tipo 2.
- Desde cualquier base de unidad móvil o centro médico se puede acceder a un posible punto de infección siempre y cuando se encuentre dentro de su radio de cobertura.
- Las distancias se encuentran en base a la fórmula Haversine [9], es decir, se mide la distancia entre dos puntos de acuerdo a su latitud y longitud; además, las distancias no toman en cuenta los objetos que obstruyen su paso, como lo son en nuestro caso de estudio los diferentes sistemas montañosos que se encuentran en el área metropolitana de Monterrey.

Con los anteriores puntos aclarados podemos retomar los resultados obtenidos durante la experimentación.

6.1.1 RESULTADOS DE LA INSTANCIA ESTE.

Parte de los resultados de la zona Este se pueden ver la Figura 7. Se asume que cada una de las bases de unidades móviles cubren a los posibles puntos de infección más cercanos a ella respetando los límites entre las zonas Este y Oeste, pero comparten las bases de unidades móviles entre los posibles puntos de infección de los diferentes municipios. Por ejemplo, la base de unidad móvil localizada en General Escobedo cubre a los posibles puntos de infección de ese municipio y a dos más, uno al norte de Apodaca y otro en noroeste de San Nicolás de los Garza.

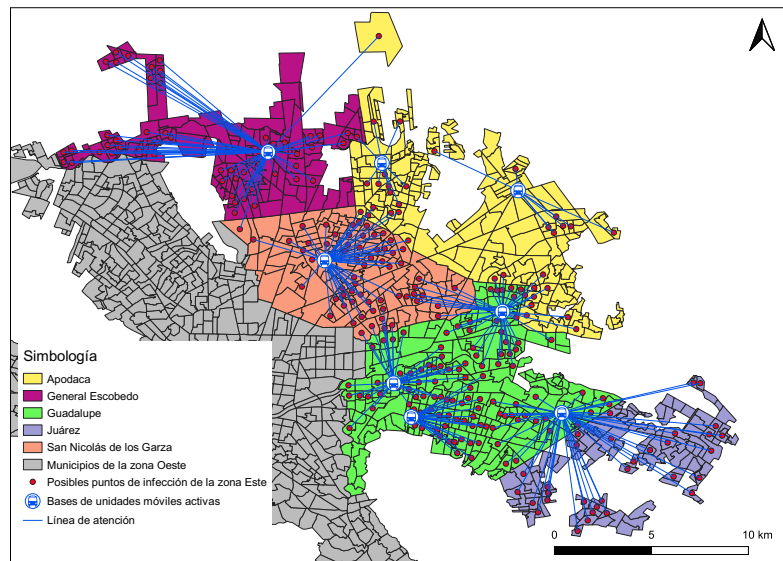


Figura 7: Bases de unidades móviles localizadas en la zona Este.

El caso de los centros médicos (ver Figura 8) es similar al de las bases de unidades móviles, se siguen respetando límites y compartiendo centros médicos entre los municipios de su zona. Por ejemplo, los centros médicos ubicados en los extremos de General Escobedo y Guadalupe atienden a dos municipios respectivamente, el primero asiste a los posibles puntos de infección de General Escobedo, algunos de estos teniendo que atravesar parte de la zona cercana al Cerro del Topo Chico, y a un posible punto de infección al norte de Apodaca. El segundo, atiende a los posibles puntos de infección de la zona oriente de Guadalupe y a todo el municipio de Juárez.

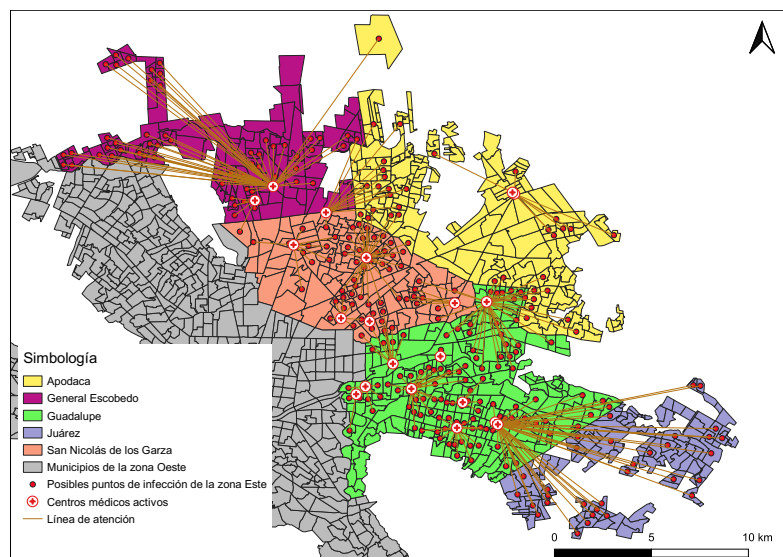


Figura 8: Centros médicos localizados en la zona Este.

Con lo anterior se puede decir que la instancia Este se resolvió correctamente según los radios de cobertura asignados a los tipos de unidades móviles ya que en ambos casos se localizó la base de unidad móvil o el centro médico más cercano a los posibles puntos de infección.

6.1.2 RESULTADOS DE LA INSTANCIA OESTE.

En cuanto a los resultados de la zona Oeste podemos observar que se encuentra mejor delimitada que la zona Este, esto por la mayor cantidad de bases de unidades móviles (ver Figura 9) y centros médicos (ver Figura 10) localizados en el área. Además, se consideran distancias más pequeñas para atender o cubrir puntos de infección en comparación con la instancia Este. También se debe considerar la cantidad de posibles puntos de atención que posee, la cual es menor que la instancia Este, así como la distribución de estos.

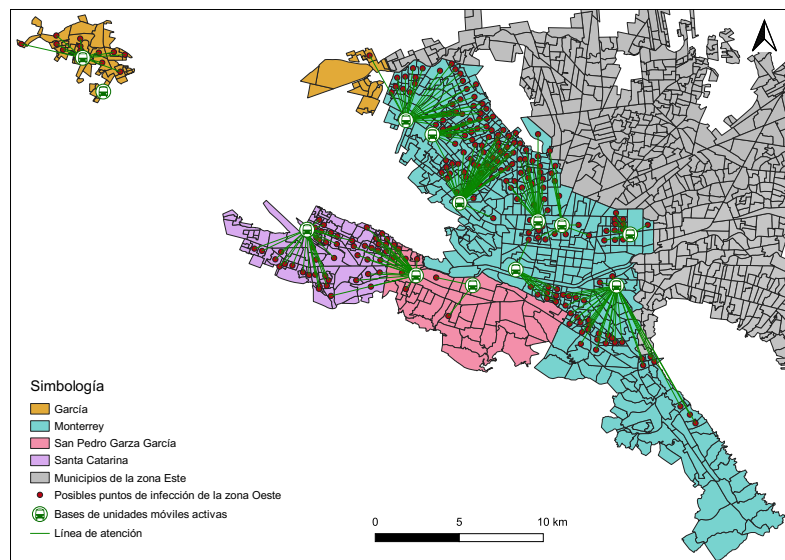


Figura 9: Bases de unidades móviles localizadas en la zona Oeste.

En ambos casos se continúa respetando los límites con la zona Este. Además de contar con al menos una base de unidad móvil o centro médico por municipio, como lo es el caso de García (ver Figura 10) al contar con solo un centro médico.

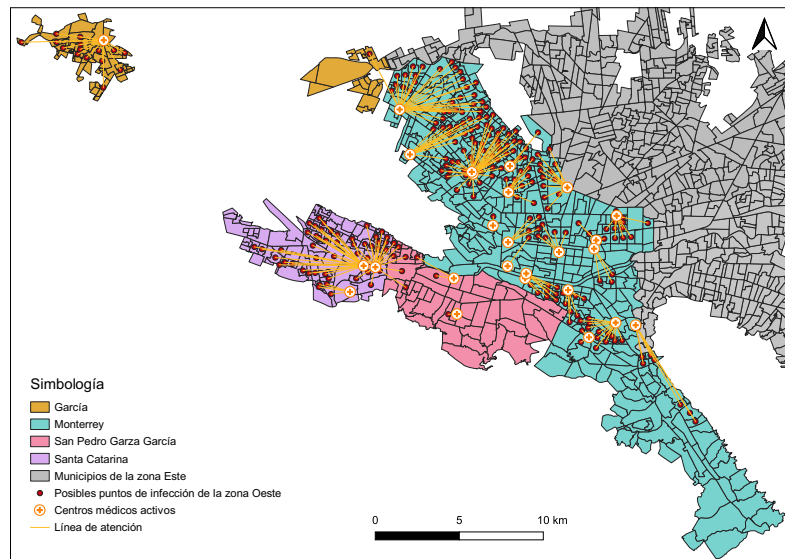


Figura 10: Centros médicos localizados en la zona Oeste.

Al igual que la instancia Este, la instancia Oeste se ejecutó correctamente bajo las mismas condiciones, sin embargo la gran diferencia entre ambas fue que en esta instancia se muestra una imagen más clara debido a las distancias existentes.

6.1.3 RESULTADOS DE LA INSTANCIA METROPOLITANA.

Con relación a la zona Metropolitana (ver Figura 11) podemos ver como se comparten las bases de unidades móviles entre los límites de los municipios de la zona Este y Oeste cubriendo los posibles puntos de infección de ambas zonas, a diferencia de la unión de las instancias Este y Oeste (ver Figura 12). Es decir, si una base de unidad móvil esta ubicada en la zona Este y una de sus unidades móviles puede cubrir a un posible punto de infección ubicado en la zona Oeste, dado a su radio de cobertura y a que su distancia es menor a la de una base de unidad móvil de la zona Oeste, entonces la base de la zona Este lo cubre, o viceversa. Se podría decir que es esta es una ventaja al utilizar la instancia Metropolitana ya que se puede reducir su distancia.

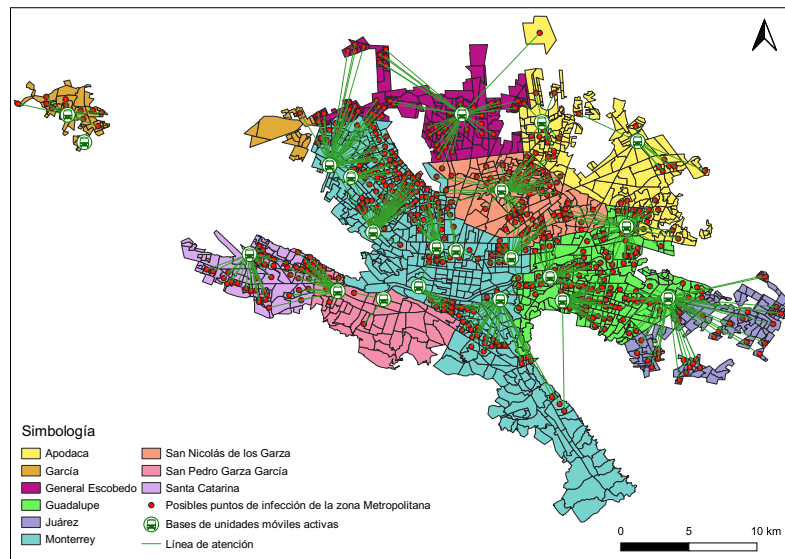


Figura 11: Bases de unidades móviles ubicadas de la zona Metropolitana.

Ahora, la ventaja de la unión de las instancias Este y Oeste (ver Figura 12) sobre la instancia Metropolitana (ver Figura 11) es que no se atraviesan sistemas montañosos desde una base de unidad móvil a un posible punto de infección como lo hace la instancia Metropolitana, por ejemplo, en el caso de ir de una base de unidad móvil desde Guadalupe hasta un posible punto de infección en la zona sur de Monterrey atravesando el Cerro de la Silla.

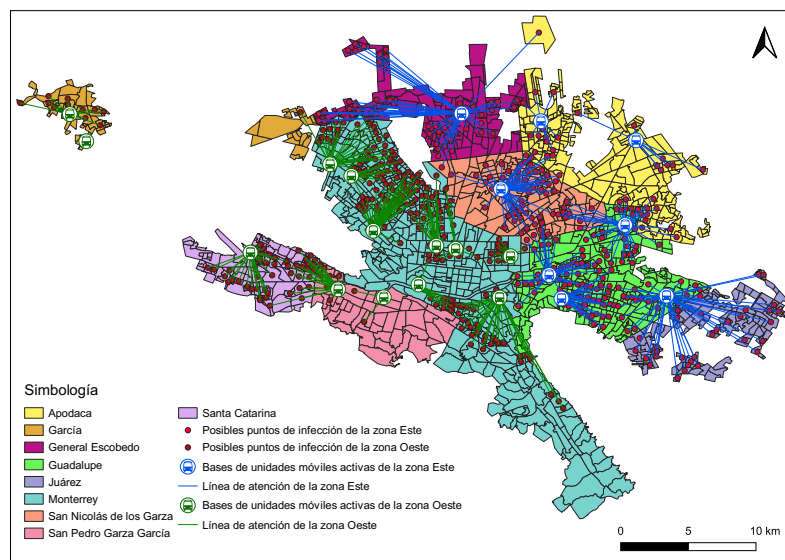


Figura 12: Bases de unidades móviles ubicadas en la unión de las instancias Este y Oeste.

Por otra parte, es similar el caso de los centros médicos en la instancia Metropolitana (ver Figura 13) al de las bases de unidades móviles en cuanto a compartir los centros,

ya que poseen las mismas características. También es semejante al volver a través un sistema montañoso, en el caso de ir desde un posible punto de infección en la zona sur de Monterrey hasta un centro médico en Guadalupe atravesando el Cerro de la Silla.

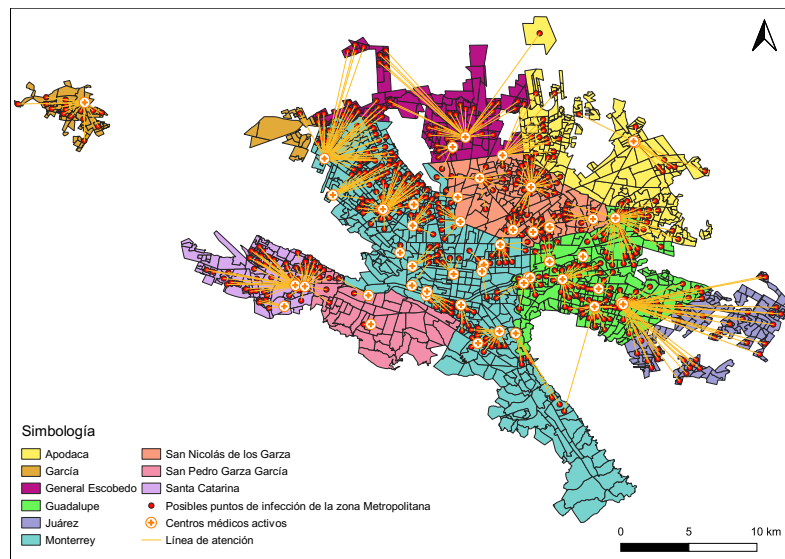


Figura 13: Centros médicos ubicados de la zona Metropolitana.

La variación aparente que presenta la unión de las instancias Este y Oeste (ver Figura 14), es que igualmente se atraviesa parte de la zona cercana al Cerro del Topo Chico para ir desde un posible punto de infección al Oeste de General Escobedo hasta un centro médico en el centro del mismo municipio.

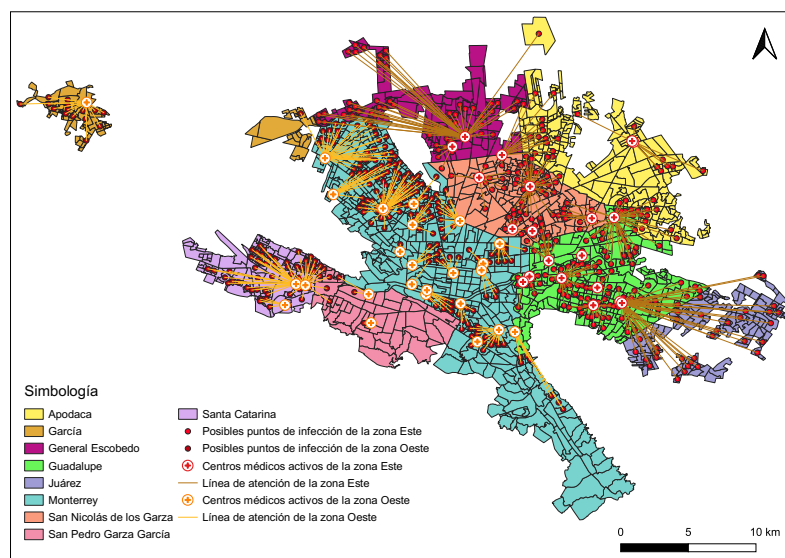


Figura 14: Centros médicos ubicados en la unión de las instancias Este y Oeste.

Dadas las comparaciones anteriores entre la instancia Metropolitana y la unión de las instancias Este y Oeste es evidente que si se desea resolver toda el área Metropolitana se debe utilizar esta misma instancia dado a sus ventajas, de otro modo se podría utilizar alguna de las otras dos instancias. En cuanto a su ejecución, fue similar a las dos anteriores sin presentar anomalías.

6.1.4 RESULTADOS DE LA INSTANCIA RURAL.

Como lo menciona su nombre la instancia esta comprendida por la zona rural, por lo tanto, los posibles puntos de infección se encuentran alejados de la zona urbana, mismos que a la vez se encuentran ubicados en las zonas rurales de los municipios de García, Santa Catarina, General Escobedo, Apodaca, Guadalupe y Juárez. Por tal motivo las bases de unidades móviles y centros médicos que se utilizaron en esta instancia son los más cercanos a estas zonas.

En el caso de la base de unidad móvil localizada en Monterrey (ver Figura 15) se seleccionó esta por su cercanía a los posibles puntos de infección que puede cubrir a pesar de ubicarse en una zona céntrica.

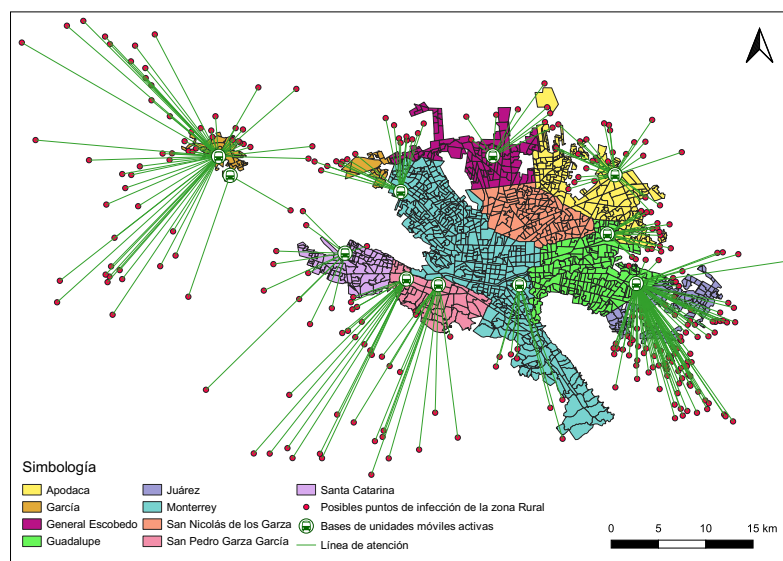


Figura 15: Bases de unidades móviles abiertas de la zona Rural.

Como vemos en ambos casos, tanto las bases de unidad móvil (ver Figura 15) como los centros médicos (ver Figura 16) atienden o cubren los posibles puntos de atención más cercanos a ellos sin importar si pertenecen a su municipio, como lo es el caso de las dos bases de unidades móviles y del centro médico localizados en San Pedro Garza García

que atienden a los posibles puntos de infección del municipio de Santa Catarina por su cercanía.

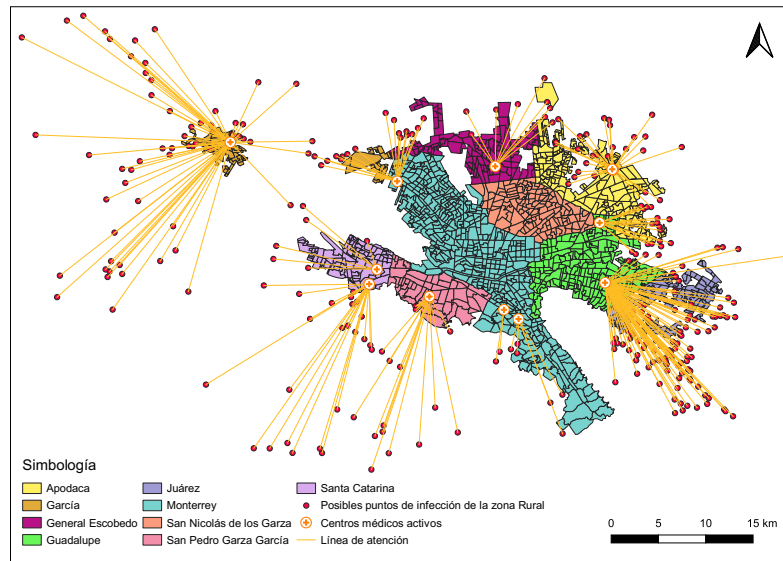


Figura 16: Centros médicos abiertos de la zona Rural.

Sin importar que sean distancias más grandes a comparación de las instancias anteriores la instancia no presentó problema alguno a pesar de que los radios de cobertura utilizados son igualmente más grandes.

Recapitulando, las cuatro instancias obtuvieron correctamente las distancias más pequeñas desde una base de unidad móvil a un posible punto de infección o desde un posible punto de infección a un centro médico, es decir, que obtienen el menor tiempo total de ir de una base a un punto de infección, de un punto de infección a un centro médico y del centro médico regresar a una base, más el tiempo de realizar la prueba en un punto de infección como se muestra en el ejemplo de la Figura 17.

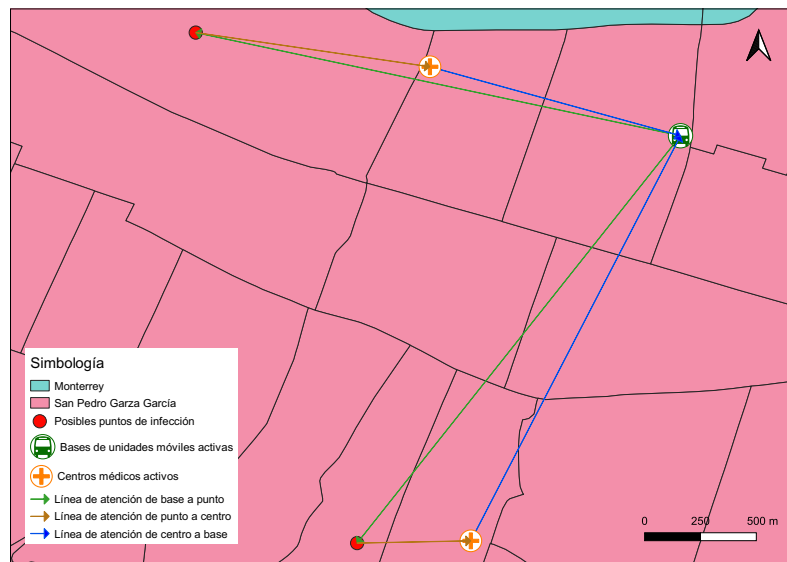


Figura 17: Tiempo total del recorrido.

Para cada una de las instancias se aplicó el mismo procedimiento demostrando que todas son fiables, inclusive que existen variantes para su resolución como lo es el caso de la instancia Metropolitana con la unión de las instancias Este y Oeste, además de existir los casos particulares de las instancias Este y Oeste si se deseara resolver solo una parte del área Metropolitana, sin olvidar que se cuenta con otra versión para la zona Rural.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

En esta tesis se estudió un problema de programación lineal binario para la resolución de la problemática relacionada al servicio a domicilio tercerizado para la realización de las pruebas Covid–19 en el área metropolitana de Monterrey.

En base a la información investigada y recabada se demostró que el hecho de implementar un servicio a domicilio tercerizado en aquellos centros médicos que no cuentan con ese servicio es una estrategia útil y oportuna. Eso puede ayudar a detectar rápidamente el virus y evitar su propagación, debido a que instalar estratégicamente bases de unidades móviles y centros médicos facilitan el acceso a los posibles puntos de infección para la realización de la prueba.

De igual manera, en esta investigación se estudiaron y analizaron artículos relacionados con la localización y asignación de servicios de ambulancias, servicios de salud, entre otros. En específico, se puso primordial atención en problemas de gran escala con relación a dichos servicios. Por ejemplo, artículos relacionados con la pandemia del Covid–19. Esto sirvió como base y apoyo para el desarrollo de nuestro modelo propuesto.

A partir de este análisis se puede observar dos importantes aportaciones que se obtuvieron de esta investigación. La primera, un modelo de programación lineal binario capaz de localizar y asignar servicios de unidades móviles y centros médicos para la obtención del menor tiempo posible que toma realizar las pruebas y trasladarlas a algún centro médico. El segundo aporte es la aplicación de dicho modelo matemático en la situación de pandemia por el Covid–19. No se tiene un antecedente o registro de un problema similar que aborde estos temas en específico, es decir, la localización de servicios de unidades móviles y centros médicos durante una pandemia.

Para demostrar la utilidad del servicio tercerizado y la efectividad del modelo se ejemplificaron cuatro instancias con datos reales de la zona metropolitana de Monterrey. Se empleó un algoritmo capaz de utilizar la fórmula Haversine para calcular las distancias, es decir, en lugar de considerar las euclidianas, se consideró el relieve de la superficie terrestre con la finalidad de obtener resultados más semejantes a la realidad. Con esto, se evidencia cómo las bases de unidades móviles y centros médicos pueden cubrir todas las llamadas recibidas incluyendo las de las zonas rurales de los municipios del área metropolitana. Por lo cual, se puede apreciar en cuales lugares convendría más la localización de un centro médico o de una base de unidad móvil según la cantidad y distribución de posibles puntos de infección. También se obtuvo el menor tiempo posible en realizar el trayecto desde una base de unidad móvil hasta un posible punto de infección, de este a un centro médico y regresar a la base de unidad móvil, más el tiempo en tomar la prueba.

De los resultados obtenidos en la experimentación computacional, se concluyó que estos ayudan indudablemente a tomar una decisión más clara y precisa, según sea el caso planteado. Por ejemplo, si se trata de la zona metropolitana existen variantes para su resolución dadas sus ventajas, ya sean los casos particulares de las zonas Este u Oeste o la unión de ambas. Similarmente, en cada caso se pueden encontrar soluciones variadas, según lo que convenga emplear.

Con lo anterior podemos concluir que la importancia de esta investigación es la búsqueda de nuevos conocimientos, pues aún quedan muchas preguntas por resolver, algunas de las cuales se fueron planteando durante la investigación y otras se desarrollaron con la implementación del modelo. Además de las que se crearon por las circunstancias en las que se desarrolla esta pandemia. No hay que olvidar que otro de los puntos importantes de este estudio es su impacto social, ya que nos interesa saber cómo afecta a la sociedad y en qué medida esto lo podemos modelar para obtener una solución más apta.

7.1 TRABAJO FUTURO

Como una de las ideas a investigar para un trabajo a futuro tenemos que se podrían considerar en el modelo las limitantes de capacidad, ya sea por la cantidad de pruebas que pudieran recibir y analizar un centro médico o por pruebas disponibles. Así como la distribución de las mismas, o bien, se podrían considerar ambos puntos: la cantidad de pruebas que puede recibir el centro médico y la cantidad de pruebas con las que se

cuenta. Dado que nuestro modelo solo minimiza el tiempo total en realizar una prueba, esto podría tener como consecuencia el aumento del número de pruebas tercerizadas.

Otra de las líneas de investigación a considerar es el horizonte de trabajo de los centros médicos, ya que dentro de la información obtenida se marcaba como un día laboral a la jornada de ocho horas. Esto nos conduce a plantear la siguiente pregunta: ¿en cuántos días laborales se cubrirían a todos los posibles puntos de infección del área metropolitana? Inclusive si convendría abrir nuevos centros médicos o bases de unidades móviles, esto por las actualizaciones que presentan la Secretaria de Salud Pública del Estado.

Siguiendo con el trabajo a futuro, uno de los propósitos a incluir para obtener resultados más reales es el hecho de considerar las listas de espera. Estas funcionarían un papel importante dentro del modelo, ya que así se llevaría un control, con lo cual se podría generar un sistema que lleve un orden, ya sea de gravedad, prioridad o llamada, ya que en la mayoría se tenía que contar con una cita previa.

Por último, se puede profundizar en el tiempo total del recorrido, considerando que en este estudio se utilizaron distancias Haversine y no las rutas de trayecto reales del área metropolitana de Monterrey. Esto solo por mencionar algunos de los temas con los cuales enriquecer más el trabajo de esta investigación, sin olvidar la de creación de nuevas instancias que proporcionen información relevante, así como la implementación de una heurística dado la cantidad de datos utilizados.

BIBLIOGRAFÍA

- H. Aghamohammadi, M. S. Mesgari, D. Molaei, and H. Aghamohammadi. Development a heuristic method to locate and allocate the medical centers to minimize the earthquake relief operation time. *Iranian journal of public health*, 42(1):63, 2013.
- T. Andersson and P. Värbrand. Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. *Journal of the Operational Research Society*, 58(2):195–201, 2007.
- A. A. Anparasan and M. A. Lejeune. Data laboratory for supply chain response models during epidemic outbreaks. *Annals of Operations Research*, 270(1-2):53–64, 2018.
- R. Aringhieri, G. Carello, and D. Morale. Ambulance location through optimization and simulation: the case of milano urban area. 2007.
- N. Aydin. A stochastic mathematical model to locate field hospitals under disruption uncertainty for large-scale disaster preparedness. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 6(2):85–102, 2016.
- A. Babaei and K. Shahanaghi. A new model for planning the distributed facilities locations under emergency conditions and uncertainty space in relief logistics. *Uncertain Supply Chain Management*, 5(2):105–125, 2017.
- L. Brotcorne, G. Laporte, and F. Semet. Ambulance location and relocation models. *European journal of operational research*, 147(3):451–463, 2003.
- A. B. Calvo and D. H. Marks. Location of health care facilities: an analytical approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 7(5):407–422, 1973.
- Ó. Camino Costa. *Desarrollo de una aplicación de realidad aumentada sobre Android para el apuntamiento de los nodos en el telescopio de neutrinos Antares*. PhD thesis, 2013.
- W. Chang. National influenza experience in hong kong, 1968. *Bulletin of the World Health Organization*, 41(3-4-5):349, 1969.

- I. N. de Estadística y Geografía (INEGI). Mapas. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636>, 2005. (Accessed on 20/06/2020).
- I. N. de Estadística y Geografía (INEGI). Biblioteca digital de mapas. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=0710000000000000&ag=19>, 2010a. (Accessed on 20/06/2020).
- I. N. de Estadística y Geografía (INEGI). Datos abiertos. <https://www.inegi.org.mx/servicios/datosabiertos.html>, 2010b. (Accessed on 29/07/2020).
- I. N. de Estadística y Geografía (INEGI). Catálogo único de claves de áreas geoestadísticas estatales, municipales y localidades. <https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>, 2020. (Accessed on 20/12/2020).
- G. de Nuevo León. Centros de atención médica salud nuevo león. <http://plataforma.saludnl.gob.mx/covid19/centrosatencion.html>, 2020a. (Accessed on 25/11/2020).
- G. de Nuevo León. Pruebas covid-19 — gobierno del estado de nuevo león. <https://www.nl.gob.mx/series/pruebas-covid-19>, 2020b. (Accessed on 24/11/2020).
- S. de Regulación y Fomento Sanitario. Acciones covid. acciones estratégicas de la subsecretaría de regulación y fomento sanitario por la emergencia de covid-19. <http://saludnl.gob.mx/regulacion-sanitaria/index.php/acciones-covid/>, 2020. (Accessed on 20/06/2020).
- M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet. A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel computing*, 27(12):1641–1653, 2001.
- W. Gu, X. Wang, and S. E. McGregor. Optimization of preventive health care facility locations. *International journal of health geographics*, 9(1):17, 2010.
- W.-j. Guan, Z.-y. Ni, Y. Hu, W.-h. Liang, C.-q. Ou, J.-x. He, L. Liu, H. Shan, C.-l. Lei, D. S. Hui, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in china. *New England journal of medicine*, 382(18):1708–1720, 2020.
- W. Hatta, C. S. Lim, A. F. Z. Abidin, M. H. Azizan, and S. S. Teoh. Solving maximal covering location with particle swarm optimization. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(4):3301–3306, 2013.
- S. G. Henderson and A. J. Mason. Ambulance service planning: simulation and data visualisation. In *Operations research and health care*, pages 77–102. Springer, 2005.

- H. Hernández. Mortalidad por covid-19 en México. notas preliminares para un perfil sociodemográfico. *Notas de coyuntura del crim*, (36):7, 2020.
- L. Jánošíková. Reduction of a hospital network as a multiple criteria optimisation problem. 2009.
- H. Jia, F. Ordóñez, and M. Dessouky. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *IIE transactions*, 39(1):41–55, 2007.
- S. Khodaparasti, H. Maleki, S. Jahedi, M. Bruni, and P. Beraldi. Enhancing community based health programs in Iran: a multi-objective location-allocation model. *Health care management science*, 20(4):485–499, 2017.
- D. B. Louria, H. L. Blumenfeld, J. T. Ellis, E. D. Kilbourne, D. E. Rogers, et al. Studies on influenza in the pandemic of 1957-1958. ii. pulmonary complications of influenza. *The Journal of clinical investigation*, 38(1):213–265, 1959.
- V. Marianov and P. Taborga. Optimal location of public health centres which provide free and paid services. *Journal of the Operational Research Society*, 52(4):391–400, 2001.
- P. Mitropoulos, I. Mitropoulos, I. Giannikos, and A. Sissouras. A biobjective model for the locational planning of hospitals and health centers. *Health Care Management Science*, 9(2):171–179, 2006.
- L. Murawski and R. L. Church. Improving accessibility to rural health services: The maximal covering network improvement problem. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43(2):102–110, 2009.
- J. S. Nguyen-Van-Tam and A. W. Hampson. The epidemiology and clinical impact of pandemic influenza. *Vaccine*, 21(16):1762–1768, 2003.
- M. Nicola, Z. Alsafi, C. Sohrabi, A. Kerwan, A. Al-Jabir, C. Iosifidis, M. Agha, and R. Agha. The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (covid-19): A review. *International journal of surgery (London, England)*, 78:185, 2020.
- G. W. H. Organization. Who coronavirus disease (covid-19) dashboard. <https://covid19.who.int/>, 2020. (Accessed on 07/09/2020).
- A. E. R. Ortega, L. A. Pomar, and J. P. Peña. Diseño metodológico para la ubicación de ambulancias del sector de atención prehospitalaria en Bogotá dc 1. *Revista Ingeniería Industrial*, 6(1), 2007.
- P. K. Ozili and T. Arun. Spillover of covid-19: impact on the global economy. *Available at SSRN 3562570*, 2020.

- J. A. Paul and R. Batta. Models for hospital location and capacity allocation for an area prone to natural disasters. *International Journal of Operational Research*, 3(5): 473–496, 2008.
- G. Polo, C. M. Acosta, F. Ferreira, and R. A. Dias. Location-allocation and accessibility models for improving the spatial planning of public health services. *PloS one*, 10(3): e0119190, 2015.
- S.-u. Rahman and D. K. Smith. Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations, 2000.
- C. Revelle and S. Snyder. Integrated fire and ambulance siting: A deterministic model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 29(4):261–271, 1995.
- F. Silva and D. Serra. Locating emergency services with different priorities: the priority queuing covering location problem. *Journal of the Operational Research Society*, 59(9): 1229–1238, 2008.
- L. Simonsen, M. J. Clarke, L. B. Schonberger, N. H. Arden, N. J. Cox, and K. Fukuda. Pandemic versus epidemic influenza mortality: a pattern of changing age distribution. *Journal of infectious diseases*, 178(1):53–60, 1998.
- L. Sun, G. W. DePuy, and G. W. Evans. Multi-objective optimization models for patient allocation during a pandemic influenza outbreak. *Computers & Operations Research*, 51:350–359, 2014.
- T. M. Tumpey, C. F. Basler, P. V. Aguilar, H. Zeng, A. Solórzano, D. E. Swayne, N. J. Cox, J. M. Katz, J. K. Taubenberger, P. Palese, et al. Characterization of the reconstructed 1918 spanish influenza pandemic virus. *science*, 310(5745):77–80, 2005.
- UNESCO. Perturbación y respuesta de la educación de cara al covid-19. <https://es.unesco.org/covid19/educationresponse>, 2020. (Accessed on 14/09/2020).
- J. G. Villegas, C. Castañeda, and K. A. Blandón. Mejoramiento de la localización de ambulancias de atención prehospitalaria en medellín (colombia) con modelos de optimización. *CLAIO/SBPO2012*, 123:12, 2012.
- P. Yin and L. Mu. Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. *Applied Geography*, 34:247–254, 2012.
- Z. Y. Zu, M. D. Jiang, P. P. Xu, W. Chen, Q. Q. Ni, G. M. Lu, and L. J. Zhang. Coronavirus disease 2019 (covid-19): a perspective from china. *Radiology*, page 200490, 2020.

AUTOBIOGRAFÍA

Diana Jazmín Jasso Díaz

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias
con Orientación en Matemáticas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

tesis:

UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN
APLICADO AL SISTEMA DE SALUD DURANTE LA
PANDEMIA POR EL COVID-19

Nací el 24 de febrero de 1995 en el estado de Nuevo León, México. Soy la primogénita hija del Sr. Baldemar Jasso Rojas y la Sra. Ma. de la Paz Díaz Camarillo. Soy egresada de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en la Licenciatura en Matemáticas en el año 2018. Posteriormente, en el año 2019 comencé mis estudios de maestría en base a problemas de localización y asignación de instalaciones.